

***В. А. Пожого\*, О. З. Умарова, А. Е. Иванов***

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
г. Москва

\**zeramful@gmail.com*

Научный руководитель – проф., д-р техн. наук *С. В. Скворцова*

## **ФОРМИРОВАНИЕ БИМОДАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ В ОПЫТНОМ ЖАРОПРОЧНОМ СПЛАВЕ НА ОСНОВЕ АЛЮМИНИДА ТИТАНА**

В работе показано, что дополнительное легирование 0,45 масс. % водорода с последующей пластической деформацией в наводороженном состоянии, закалкой с температуры, обеспечивающей примерно равное объемное содержание  $\alpha_2$  и  $\beta$ -фаз в структуре, и двухступенчатым вакуумным отжигом позволяют сформировать в опытном сплаве на основе  $Ti_3Al$  (Ti–14Al–3Nb–3V–0,5Zr) бимодальную структуру.

*Ключевые слова:* жаропрочный титановый сплав, интерметаллид, алюминид, термоводородная обработка, вакуумный отжиг.

***V. A. Pozhoga, O. Z. Umarova, A. E. Ivanov***

## **FORMATION OF BIMODAL STRUCTURE IN A PILOT HEAT-RESISTANT ALLOY BASED ON TITANIUM ALUMINIDE**

Additional alloying with 0.45 wt. % of hydrogen followed by plastic deformation in hydrogenated state, quenching from the temperature providing equal volume content of  $\alpha_2$  and  $\beta$ -phases in the structure, and also a two-step vacuum annealing allows to form bimodal structure in pilot alloy based on  $Ti_3Al$  (Ti–14Al–3Nb–3V–0,5Zr).

*Keywords:* heat-resistant titanium alloy, intermetallide, aluminide, thermo-hydrogen treatment, vacuum annealing.

Термоводородная обработка (ТВО) является одним из наиболее эффективных способов управления структурой в сплавах на основе интерметаллида титана  $Ti_3Al$ , имеющих малую объемную долю  $\beta$ -фазы.

В сплаве Ti–14Al–3Nb–3V–0,5Zr по аналогии с жаропрочными псевдо- $\alpha$ -титановыми сплавами ТВО может обеспечивать формирование ( $\alpha_2+\beta$ )-структуры, в которой  $\alpha_2$ -фаза присутствует в виде двух структурных составляющих – первичной и мелкодисперсной вторичной, размер и морфология которых определяются структурой исходного полуфабриката и температурно-концентрационными параметрами ТВО.

Первичная  $\alpha_2$ -фаза сохраняется в структуре в процессе обработки, а вторичная  $\alpha_2$ -фаза выделяется в процессе дегазации из водородосодержащей  $\beta$ -фазы.

Для формирования бимодальной структуры, обеспечивающей высокий комплекс механических свойств, объемная доля первичной  $\alpha_2$ -фазы должна быть не меньше 50 %. На основании ранее проведенных исследований [1] образцы из сплава Ti–14Al–3Nb–3V–0,5Zr насыщали водородом 0,45 масс. % и проводили закалку с температуры 1015 °C. Структура сплава представлена первичной  $\alpha_2$ -фазой и  $\beta$ -фазой (рис. 1).

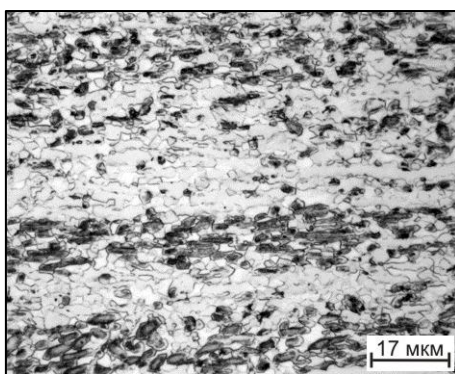


Рис.1. Микроструктура сплава Ti–14Al–3Nb–3V–0,5Zr с концентрацией водорода 0,45 масс. %, после закалки 1015 °C

Формирование окончательной структуры в сплаве Ti–14Al–3Nb–3V–0,5Zr происходит на заключительном этапе ТВО – вакуумном отжиге. Параметры структуры, ее стабильность определяются как температурно-временными режимами вакуумной обработки, так и исходным структурным состоянием водородосодержащего сплава.

С целью изучения возможности формирования бимодальных структур были выбраны две температуры вакуумного отжига 800 и 950 °C. Продолжительность вакуумного отжига при всех температурах должна обеспечивать удаление водорода до безопасных концентраций (не более 0,006-0,008%). При температуре вакуумного отжига 950 °C и выдержке 2 часа формируется структура с рекристаллизованной крупнозернистой  $\alpha_2$ -фазой и малым (менее 10 %) количеством  $\beta$ -фазы (рис. 2, а).

При температуре вакуумного отжига 850°C и выдержке в течение 4 часов формируется структура, также состоящая из  $\alpha_2$ -фазы с небольшим количеством  $\beta$ -фазы (рис. 2, б).

Таким образом, закалка из ( $\alpha_2+\beta$ )-области и последующий одноступенчатый вакуумный отжиг не приводит к формированию бимодальной структуры.

Поэтому на следующем этапе работы было проведено предварительное старение в вакуумной печи с целью изотермического

распада  $\beta$ -фазы и выделения мелкодисперсной  $\alpha_2$ -фазы, являющейся «зародышами» вторичной  $\alpha_2$ -фазы.

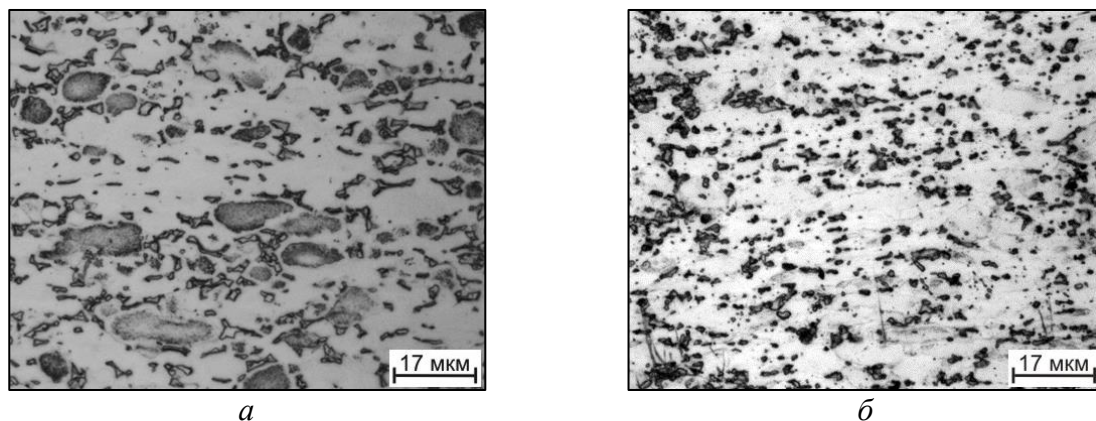


Рис. 2. Микроструктура сплава Ti–14Al–3Nb–3V–0,5Zr с концентрацией водорода 0,45 масс. % после вакуумного отжига: *а* – 950 °С, выдержка 2 часа; *б* – 850 °С, выдержка 4 часа

При этом температура старения не должна превышать 600 °С для того, чтобы избежать интенсивной дегазации, которая может привести к неоднородной структуре. В сплаве с 0,45 % водорода минимальная устойчивость  $\beta$ -фазы имеет место при температуре 550 °С. Учитывая результаты проведенных исследований, были выбраны следующие температуры и продолжительность вакуумной обработки: изотермическая выдержка в течение 3 часов при температуре 550 °С последующим нагревом до температуры 850 °С и выдержки в течение 3 часов (рис. 3).

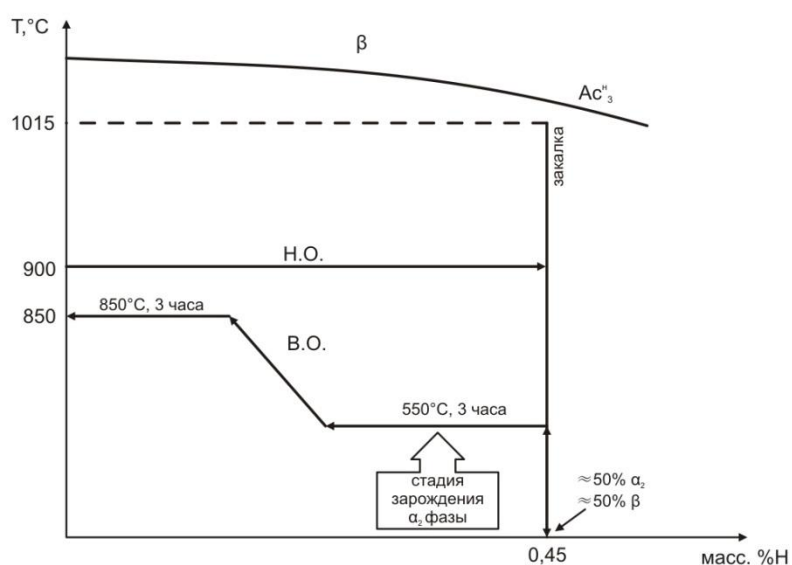


Рис. 3. Схема термоводородной обработки сплава Ti–14Al–3Nb–3V–0,5Zr

Двухступенчатый вакуумный отжиг позволил получить бимодальную структуру в образцах из сплава Ti-14Al-3Nb-3V-0,5Zr (рис. 4).

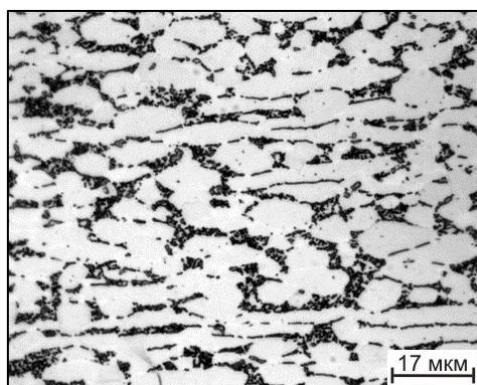


Рис. 4. Микроструктура образца из сплава Ti-14Al-3Nb-3V-0,5Zr, предварительно легированного 0,45 масс. % Н, после двухступенчатого вакуумного отжига

Это обусловлено тем, что зарождение  $\alpha_2$ -фазы происходит по сдвиговому механизму с формированием когерентной межфазной границы [2; 3]. Вследствие большого объемного эффекта  $\beta \rightarrow \alpha_2$ -превращения на когерентной границе возникают высокие упругие напряжения. В совокупности с пониженной прочностью  $\beta$ -матрицы (из-за присутствия водорода) это приводит к потере когерентной связи зародыша с матрицей уже на ранней стадии роста, т. е. рост  $\alpha_2$ -фазы по сдвиговому механизму с мартенситной кинетикой прекращается. Действие же диффузионного механизма роста затруднено ввиду низких температур реализации  $\beta \rightarrow \alpha_2$ -превращения и пониженных коэффициентов диффузии основных легирующих элементов. Таким образом, при наличии термодинамического стимула  $\beta \rightarrow \alpha_2$ -превращения процессы зарождения  $\alpha_2$ -фазы преобладают над процессами ее роста и на низкотемпературной ступени вакуумного отжига образуется исключительно мелкодисперсная  $\alpha_2$ -фаза.

На второй ступени вакуумного отжига процесс распада  $\beta$ -фазы ускоряется, что сопровождается ростом вторичной  $\alpha_2$ -фазы. Кроме того, происходит некоторый рост первичной  $\alpha_2$ -фазы с соответствующим перераспределением легирующих элементов и достижением равновесного состава фаз.

Таким образом, проведенные исследования показали, что пластическая деформация образцов из сплава Ti-14Al-3Nb-3V-0,5Zr в наводороженном состоянии, последующая закалка с температуры, обеспечивающая примерно равное объемное состояние фаз в структуре, и двухступенчатый вакуумный отжиг позволяют сформировать бимодальную структуру, состоящую из первичных глобулярных частиц  $\alpha_2$ -фазы и мелкодисперсных частиц вторичной  $\alpha_2$ -фазы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пожого В. А., Гвоздева О. Н., Орлов А. А. Влияние температуры нагрева на формирование фазового состава и структуру опытного жаропрочного титанового сплава на основе  $\text{Ti3Al}$ , легированного водородом // Уральская школа молодых металлосведов: сборник материалов и докладов XVI Международной научно-технической Уральской школы-семинара металлосведов – молодых ученых (Екатеринбург, 7–11 декабря 2015 г.). В 2 ч. Ч. 2. Екатеринбург: УрФУ, 2015. 354 с. С. 97–99.
2. Водородная технология титановых сплавов / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, В. К. Носов [и др.]; под общей редакцией А. А. Ильина. М. : МИСИС. 2002. 392 с.
3. Ильин А. А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. М. : Наука, 1994. 304 с.